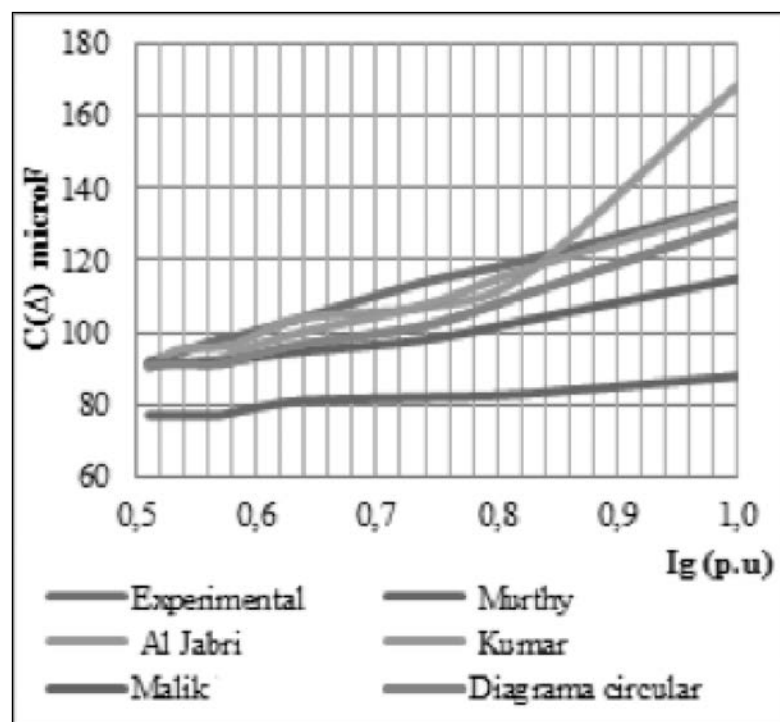


Métodos para el cálculo de capacitores de autoexcitación para el generador asíncrono

VÍCTOR BONILLA*
JAIME MARTÍNEZ*
CRISTHIAN OSPINA*
ARGEMIRO COLLAZOS*
VÍCTOR SÁNCHEZ*
RAMIRO ORTIZ*



Resumen

Este artículo contiene una recopilación de algunos métodos o técnicas utilizadas en el cálculo de capacitores de excitación para generadores asíncronos. Los resultados obtenidos a partir de este proceso, fueron validados en el laboratorio mediante el uso de tres máquinas asíncronas, con el fin de comparar su efectividad y su sencillez a la hora de implementar un método para la utilización de un banco de condensadores que sirva como generador en una máquina asíncrona.

Palabras clave: generador asíncrono, capacitores de autoexcitación.

Abstract

This article contains a compilation of some methods for calculating capacitor excitation for asynchronous generators; the results of the calculations were validated in the laboratory using three asynchronous machines, in order to compare their effectiveness and simplicity when implementing a method to the use of a bank of capacitors to be used in an asynchronous generator.

* Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correos electrónicos: v-andres456@hotmail.com, betomatu@hotmail.com, anipso.kun@gmail.com, argemiro.collazos@correounivalle.edu.co, victor.sanchez@correounivalle.edu.co, ramiro.ortiz@correounivalle.edu.co.

Fecha de recepción: 03/03/2014 • Fecha de Aceptación: 04/07/2014.

Keywords: asynchronous generator, self-excitation.

II ntroducción

Gracias a la búsqueda de fuentes alternativas de energía, se ha optado, en algunos casos, por la utilización de generadores asíncronos, ya sea por motivos económicos o técnicos, puesto que estos presentan ciertas ventajas con respecto a las máquinas sincrónicas, como: la no utilización de escobillas, el empleo de la jaula de ardilla y el no uso de fuentes independientes de corriente continua y algunos sistemas de protección (Chapman, 1999). Por otra parte, la utilización de una máquina asíncrona como generador aislado, requiere la implementación de un banco de condensadores de excitación (Demidovich, 1998).

Al depender de un banco de condensadores de excitación, se presentan diversos problemas, como puede ser la difícil regulación de la tensión, ya que esta depende de la conexión y desconexión de distintos capacitores, los cuales deben ser calculados; así mismo, dependiendo de la capacitancia, se producirá un nivel de tensión diferente. Por tal motivo, el conocimiento de diferentes métodos o técnicas para el cálculo de capacitores de excitación resulta necesario.

Algunos de los métodos existentes fueron recopilados, estudiados, validados y comparados, con el fin de tener una guía al momento de seleccionar un método para calcular el banco de capacitores de excitación. Teniendo en cuenta la complejidad y la efectividad de estos métodos, se podrá dar una recomendación para la implementación de los mismos.

2. Métodos para determinar el condensador de autoex itación

El análisis anterior indica que la máquina asíncrona en régimen de generador exige el suministro externo de potencia reactiva capacitiva para su excitación. Esta puede ser suministrada, bien sea con un banco de condensadores y/o por la red de suministro de energía eléctrica. Determinar el valor de la potencia reactiva capacitiva o del condensador de excitación, es un factor importante en este proceso. Este se puede calcular por métodos desarrollados y validados analíticamente y/o experimentalmente por diferentes escuelas e investigadores. Estos métodos, en función de la información necesaria

de la máquina asíncrona y de la carga, al igual que de los procesos matemáticos requeridos, se pueden considerar como sencillos o complejos. En el presente trabajo se indagó mediante bibliografía especializada y se encontraron diferentes métodos para el cálculo de los capacitores de autoexcitación, los cuales fueron analizados, aplicados y validados experimentalmente en las condiciones del laboratorio de PCH's. Para un mejor análisis en el desarrollo de este trabajo de investigación, los métodos estudiados se dividieron en dos grupos: métodos directos y métodos analíticos.

2. M étodos directos

Los métodos directos son, por sus características, sencillos y no requieren pruebas y/o información especializada de la máquina; además, no exigen fundamentos matemáticos avanzados.

A. Método ep erimental

Este método exige a la vez la conexión mecánica del generador asíncrono a un primomotor de velocidad variable y la conexión a la red. Apoyados en este montaje, se procede a llevar el motor hasta una velocidad cercana a la nominal; instante en el que se conecta a la red como motor. Una vez se tiene esta condición, se procede a aumentar progresivamente la velocidad en el primomotor hasta llevar el motor a la condición de generador asíncrono (velocidad mayor a la nominal). Al seguir aumentando la velocidad en el primomotor, consecuentemente aumenta el deslizamiento en el generador, al igual que la potencia activa entregada a la red. Este proceso exige un consumo proporcional de reactivos, que son suministrados por la red y registrados por el equipo de medida (Godoy & Farret, 2004).

B. Conexi ón a una fuente ex terna de reactivos

Un método similar al anterior, consiste en realizar la conexión mecánica del generador asíncrono a un primomotor de velocidad variable; sin embargo, este no se conecta eléctricamente a la red, y, por tanto, es necesaria la conexión a un banco de condensadores variable y a una carga eléctrica externa. El montaje y el procedimiento es similar al descrito en el método anterior; no obstante, la condición de estar aislado exige la "excitación independiente".

C. Parámetros nominales del motor

Este es un método bastante sencillo, cuyo funcionamiento radica en utilizar los parámetros nominales de placa del motor, a través de los cuales se infiere la potencia reactiva absorbida por el motor en condiciones nominales. Con base en esta información, se determina el capacitor por fase que requiere el motor en modo reversible (Ortiz & Teowaldo, s. f.).

2. 2 Métodos analíticos

Los métodos analíticos, además de exigir pruebas y/o información especializada de la máquina, se configuran a partir de procedimientos matemáticos que pueden llegar a tener soluciones complejas.

A. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación.

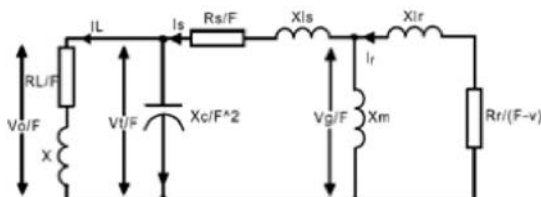
Este método corresponde al desarrollado por los investigadores: Murthy, Nagamani y Satyanarayana (1988), quienes determinan el valor de los capacitores de autoexcitación, basándose en el circuito equivalente en estado estacionario de un generador de inducción autoexcitado, con una carga en sus terminales (como se indica en la Figura 1).

Para determinar el valor del condensador de excitación, los investigadores en su análisis llegan a dos ecuaciones lineales simultáneas, en las cuales x_c y F son dos variables desconocidas:

$$f(X_c, F) = C_1 F^3 + C_2 F^2 + (C_3 x_c + C_4) F + C_5 X_c = 0$$

$$g(X_c, F) = (D_1 X_c + D_2) F^2 + (D_3 X_c + D_4) F + D_5 X_c = 0$$

Figura 1 Circuito equivalente del generador de inducción con carga



Fuente: Murthy, Nagamani y Satyanarayana (1988).

Donde: R_s , R_r es la resistencia del estator y rotor por fase en p.u; X_{ls} , X_{lr} es la reactancia de fuga por fase del estator y el rotor en p.u; X_m es la reactancia magnetizante en p.u; X_c es la reactancia capacitiva por fase en p.u; R_L y X son la resistencia y reactancia de carga por fase en p.u (todas las reactancias mencionadas están referidas a la frecuencia base); F , v corresponden a la frecuencia y velocidad en p.u., respectivamente; I_s , I_r , I_L son las corrientes del estator, rotor y de carga por fase y V_p , V_g son las tensiones en terminales y del entrehierro, respectivamente.

Para determinar estas dos variables (x_c y F), se coloca en cada una de las ecuaciones anteriores información correspondiente al circuito equivalente y a la curva de magnetización de la máquina; estas se resuelven por un método numérico, que en este caso fue el de Newton-Raphson.

Una vez encontrado el valor de X_c en p.u, se calcula su valor en Ohms mediante la impedancia base, seguidamente se determina el valor de C requerido para la autoexcitación.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

Si se requiere encontrar los capacitores de excitación para diferentes valores de carga, se debe aplicar el procedimiento anterior variando solo el valor de R_L . El análisis anterior se puede ampliar para cargas reactivas, mediante la sustitución de R_L por una impedancia de carga por fase Z_L .

B. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación, según los autores Al Jabri y Alolah (1990).

En esta sección se propone un método para determinar el capacitor mínimo C_{min} para una carga RL . Por la forma como Al Jabri y Alolah (1990) abordaron el problema, la solución matemática se caracteriza por no exigir el manejo de métodos numéricos para el cálculo del banco de capacitores necesarios para la autoexcitación, ya que se usan expresiones exactas para cada caso: operación en vacío, carga resistiva e inductiva. Los aspectos más relevantes de este método se describen en esta sección; sin embargo, el método en extenso se presenta en el artículo de los autores antes mencionados.

Al igual que el método descrito anteriormente, se parte de los datos del circuito equivalente de la máquina asíncrona en estado estacionario y se orienta a solucionar el siguiente polinomio:

$$\alpha_4 F^4 - \alpha_3 F^3 + \alpha_2 F^2 - \alpha_1 F + \alpha_0 = 0$$

Donde $\alpha_i, i=0,1,\dots,4$ son constantes positivas.

Una vez se han determinado las raíces del polinomio, se sustituyen en la siguiente ecuación y se calcula el valor de X_c en p.u.:

$$X_c = \frac{A_1 F^3 - A_2 F^2 - A_4 F}{A_3 F - A_5}$$

Con el valor de X_c en Ohms, se obtiene el valor de la capacitancia C .

La capacitancia obtenida está dada por fase; motivo por lo cual esta es equivalente a la magnitud de un banco de condensadores conectado en estrella. Por esta razón, además, se debe tener en cuenta la forma de conexión de los capacitores; aunque en la práctica generalmente se conecta un banco de condensadores en delta al estator de la máquina, con el fin de obtener la mayor cantidad de potencia reactiva.

Al aplicar este método a las condiciones de vacío, se considera que $X=0$ y R tiende a infinito. En este caso la capacitancia mínima para la autoexcitación equivale a:

$$C_{min} = [2\pi \cdot f_b \cdot Z_b \cdot (X_{smax} + X_{lr}) F_{max}^2]^{-1}$$

Donde:

$$F_{max} = \frac{1}{2} \left\{ v + \sqrt{v^2 - \frac{4R}{X_{smáx}} r} \right\}$$

C. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación, según los autores Kumar, Kumaresan y Karthigaivel (2010).

Este método también utiliza como información base el circuito equivalente de la máquina de inducción. Los aspectos más relevantes de este se describen en la presente sección; no obstante, el método en extenso se expone en el artículo

de los autores antes referidos. Como aspecto más relevante, bajo este método se indica que la capacitancia mínima con carga se determina de la siguiente forma:

$$X_c = \frac{\{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - 4K_1 K_3}\}}{2 * K_1}$$

Una vez se determinan las constantes K_1 , K_2 y K_3 siguiendo el procedimiento (Kumar, Kumaresan & Karthigaivel, 2010), se sustituyen en la ecuación anterior, cuyo resultado es una magnitud X_c de autoexcitación en p.u, la cual se transforma en Ohms.

Se presenta adicionalmente un método derivado del anterior para calcular la capacitancia requerida en vacío. En este caso los valores se calculan de una forma diferente (Kumar, Kumaresan & Karthigaivel, 2010).

D. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación.

Los autores Malik y Mazi (1987) desarrollaron un método que utiliza la reactancia de magnetización X_m y la reactancia por fase del estator X_{ls} de la máquina; parámetros obtenidos a través de las pruebas de vacío y corto circuito. De acuerdo con los autores, el método consiste en igualar el capacitor de excitación C_{exc} a las inductancias de la máquina, con el objetivo de hallar la tensión nominal en los bornes de la máquina en vacío:

$$C_{exc} = \frac{1}{\omega(X_m + X_{ls})}$$

Al considerar el generador asíncrono con carga, el valor de los capacitores de excitación C_{Lexc} debe aumentar en una proporción equivalente a K :

$$C_{Lexc} = K * C_{exc}$$

Donde:

$$K = 1 + \frac{X_m + X_{ls}}{X + R}$$

Donde: R^* es una impedancia activa vista en el lado reactivo.

Los investigadores indican que si bien el método es sencillo, este tiene una mayor exactitud al momento de calcular los valores en vacío; pese a esto, cuando se requiere este valor con carga, el método no es tan efectivo, debido a que se obtiene un error incremental hasta de un 15 %.

E. Determinación de la capacitancia de autoexcitación usando la característica de magnetización, según Vázquez (2007).

A diferencia de los métodos anteriores, Vázquez (2007) propone un método rápido y directo para determinar los capacitores requeridos para la autoexcitación, basado en la característica de magnetización de la máquina, que adicionalmente no exige la prueba de vacío a la máquina. Este método se presenta en extenso en Vázquez (2007).

De acuerdo con este método, para que la máquina asíncrona se autoexcite y entregue la tensión nominal en condiciones de vacío, es necesario determinar el valor de corriente I_m que absorbe la máquina al operar como motor de la tensión nominal en vacío, a partir de la característica de magnetización de la máquina.

En este caso, el banco de capacitores de excitación tiene una conexión en delta, en el que, al considerar tres capacitores idénticos, la corriente por cada capacitor equivale a:

$$I_c = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$$

De esta forma, el valor de la capacitancia de autoexcitación es de:

$$C = \frac{I_c}{\omega V_L}$$

F. Determinación de la capacitancia de autoexcitación usando el diagrama circular.

Como se ha visto en métodos anteriores, el proceso de cálculo de capacitores resulta ser largo y en ocasiones complicado, toda vez que se deben realizar iteraciones por el método de

Newton-Raphson, las cuales no se pueden resolver rápidamente. Por tal razón, resulta necesaria una herramienta computacional que se pueda implementar mediante un algoritmo informático. En esta sección se mostrará una técnica para calcular los capacitores de autoexcitación de una forma más sencilla y rápida.

Para determinar los capacitores de autoexcitación de la máquina, es fundamental conocer: la corriente de vacío I_μ , la cual se asume como la mitad de la corriente nominal I_{NOM} de la placa de características; el factor de potencia; la tensión y la frecuencia nominal. Estos aspectos se evalúan en la siguiente ecuación de potencia reactiva:

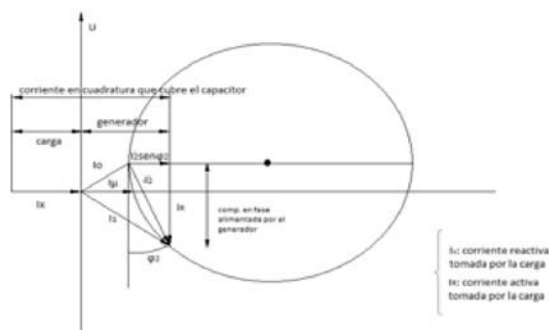
$$Q = V^* \frac{I_{Nom}}{2} = V I_\mu^* = \frac{V^2}{X_c}$$

Así, se obtiene el valor de capacitancia de autoexcitación:

$$C = \frac{I_\mu}{\omega V}$$

No obstante, los capacitores del generador asíncrono con carga requieren suministrar los reactivos de autoexcitación en vacío y el valor necesario para alimentar la carga; por tal motivo, se requiere conocer la corriente de vacío y la corriente de carga, la cual puede tener una componente activa e inductiva. Una vez obtenidos estos datos, se procede a trazar la Figura 2, donde I_μ es la corriente a través del capacitor en vacío, I_x es la componente reactiva de la corriente de carga e I_R corresponde a la componente activa de la corriente de carga.

El eje de abscisas muestra la corriente reactiva, que indica la corriente mediante los capacitores de excitación en cualquier estado de funcionamiento (vacío o carga), para poder calcular el valor de la capacitancia. Como la carga activa está a 90° de la reactiva, esta se coloca paralela al eje de coordenadas dentro de un círculo con $Rd \propto I_{nom}$; este se coloca exactamente donde termina la corriente de vacío I_μ . La magnitud de la corriente de carga I_R se traza desde el radio hasta la circunferencia, como se muestra en la Figura 2. Esto da una componente en el eje de abscisas equivalente a: $I_2 \sin \phi_2$.

Figura 2. Diagrama circular de una máquina asíncrona cuando funciona como generador

Fuente: elaboración propia.

Esta corriente se suma a la corriente capacitiva, y como la I_x es paralela al eje de abscisas, la corriente total de los capacitores es: $I_c = I_\mu + I_x + I_2 \sin \varphi_2$. Así, para hallar el valor de los capacitores en ese dicho estado de operación, se utiliza la siguiente expresión:

$$C = \frac{I_c}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \omega}$$

3 Validación de los métodos para determinar el condensador de autoexcitación

Siendo el propósito el de validar analítica y experimentalmente los métodos propuestos por diferentes escuelas y autores, se procedió inicialmente a aplicar los métodos descritos en el numeral anterior a los motores disponibles en el laboratorio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas para su validación (ver Tabla 1). Es importante destacar que los métodos directos no requieren pruebas y/o información especializada de la máquina, mientras que los métodos analíticos sí. Por lo tanto, inicialmente se realizaron las pruebas en el laboratorio con su respectivo procesamiento de datos; información que luego se correlacionó con los resultados obtenidos en cada uno de los métodos.

3.1 Pruebas

Los investigadores en sus análisis coinciden en que, para inferir el comportamiento de la máquina asíncrona como generador, es indispensable conocer los parámetros del circuito equivalente en estado estacionario, aplicado a un generador de inducción autoexcitado con una carga resistiva en sus terminales, tal como se indica en la Figura 1. Sin embargo, para obtener estos parámetros es

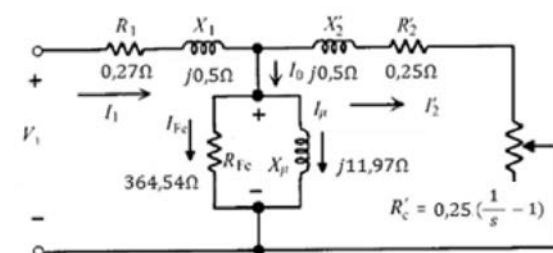
fundamental determinar para el motor asíncrono: la resistencia de sus devanados, las pérdidas de vacío y corto, y la curva de magnetización. Para hallar esta información, se midió con un puente de Kelvin la resistencia de cada uno de los devanados, teniendo en cuenta la conexión de cada motor. Así mismo, los valores obtenidos se llevaron a una conexión estrella (Y) equivalente para facilitar el cálculo de la resistencia por fase de cada devanado. Seguidamente, se realizaron las pruebas para determinar las pérdidas en vacío y corto, según la norma IEEE Std 112- 2004, haciendo énfasis en la frecuencia. Finalmente, se determinó la curva de magnetización mediante la prueba de sincronismo.

Tabla 1 Motores asíncronos utilizados en pruebas

Marca	ABB	W G	Siemens
Equipo	Nuevo	Nuevo	Usado
Tipo	Alta eficiencia	Normal	Normal
No de fases	3	3	3
Referencia	M2QA112 L4A	1001748 767	XX
FP Nominal	0,84	0,83	0,80
Tensión (V)	227/440	227/440	227/440
Corriente máx (A)	20,4/10,2	26,6/13,3	26,6/13,3
Corriente vacío (A)	11,4	13,9	18,0
Potencia (kW)	5,50	7,40	5,50
Velocidad (rpm)	1730	1760	1730
Número de devanados	6	6	6

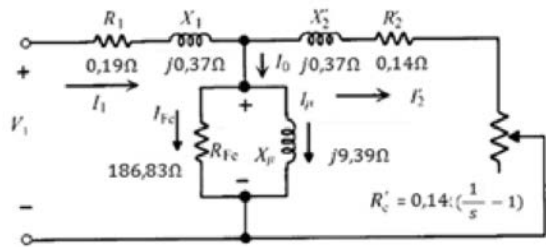
Fuente: elaboración propia.

Con los datos anteriores, y siguiendo la metodología indicada por Radin, Bruskin y Zorojovich (1988), se obtuvieron los circuitos equivalentes para los tres motores del laboratorio (ver Figura 3, 4 y 5).

Figura 3 Circuito equivalente al motor ABB

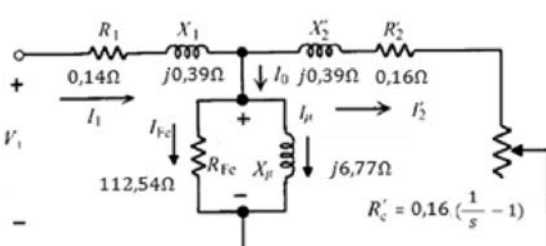
Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Circuito equivalente al motor WEG



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Circuito equivalente al motor Siemens



Fuente: elaboración propia.

3. 2 Resultados experimentales y analíticos de los métodos para determinar el condensador de autoexcitación

A fin de evaluar el nivel de convergencia cualitativa y cuantitativa de cada uno de los métodos usados para determinar la excitación externa del generador asíncrono, se tomó como referencia el método directo de “generador asíncrono interconectado”. Esta prueba se realizó en el banco de pruebas para cada uno de los motores. Este resultado permite identificar el consumo de reactivos capacitivos en función de la corriente nominal; información a partir de la cual se obtiene la característica que muestra el requerimiento de condensadores según la carga del generador interconectado.

Una vez obtenida la característica de referencia por el método directo de “generador asíncrono interconectado”, se procedió a realizar las pruebas y el procesamiento de las mismas, para los siguientes métodos directos y analíticos.

Es necesario resaltar que la segunda prueba fue la del método directo de “generador asíncrono aislado”, cuya elaboración fue más compleja, dado que exigió adicionalmente la disponibilidad de un banco de condensadores variable para el suministro de reactivos y una carga variable (banco de resistencias).

Con base en la característica de consumo de reactivos del método referido, conocemos para cada uno de los motores los requerimientos de reactivos en vacío y con carga. Esta información es la base para hacer una correlación con los resultados matemáticos obtenidos a través de los métodos “analíticos” descritos en el numeral 2. 2. Los resultados de la “conexión a la red” y de cada uno de los métodos para determinar el condensador de excitación en condiciones de vacío y a plena carga (en el caso de los motores disponibles en el laboratorio), son presentados en la Tabla 2 y 3, y en la Figura 6, 7 y 8.

Tabla 2. Comparación de los capacitores C (microF) necesarios conectados en delta “Δ” para la autoexcitación en vacío del generador, obtenidos por los métodos directos y analíticos

Tipo de prueba		Motor		
		ABB	Siemens	WEG
Métodos directos	Experimental	22	20	9
	Conexión a una fuente externa de reactivos	74	124	92
	Parámetros nominales	76,9	93,8	121,4,
Métodos analíticos	Murthy, Nagamani y Satyanarayana (1988)	71	145	77
	Al Jabri y Alolah (1990)	69	120	88
	Kumar, Kumaresan, y Karthigaivel (2010)	71	124	91
	Maliky M azi (1987)	71	121	91
	Vázquez (2007)	68	120	89
	Diagrama circular	71	118	89

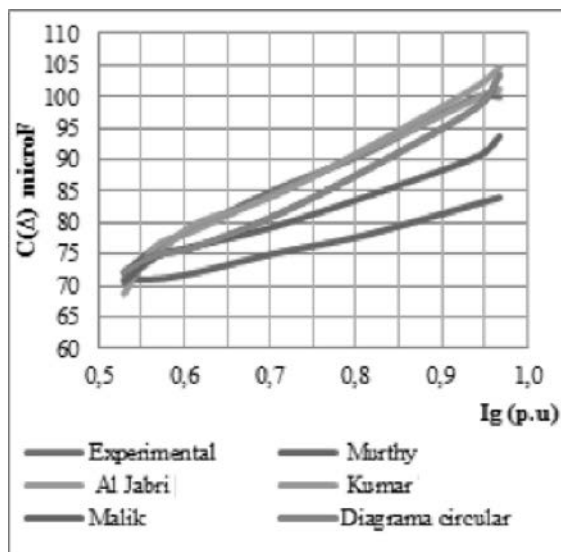
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Comparación de los capacitores C (microF) necesarios conectados en delta “ Δ ” a plena carga del generador, obtenidos por los métodos directos y analíticos

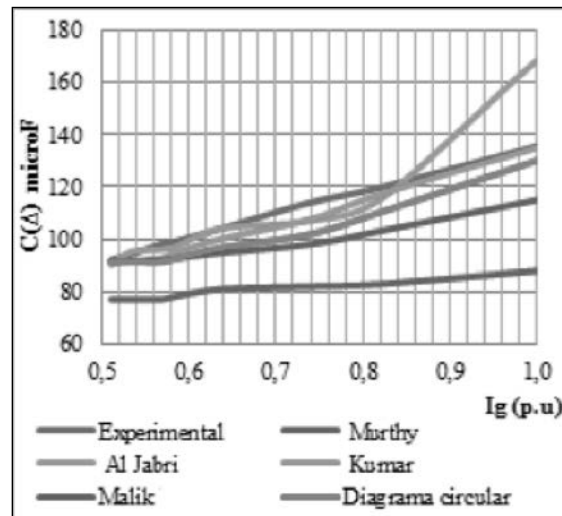
Tipo de prueba		Motor		
		ABB	Siemens	WEG
Métodos directos	Experimental	101	100	113
	Conexión a una fuente externa de reactivos	100	147	274
	Parámetros nominales	137,6	179,5	179,5
Métodos analíticos	Murthy, Nagamani y Satyanarayana (1988)	84	174	89
	Al Jabri y Alolah (1990)	101,2	168	166
	Kumar, Kumaresan, y Karthigaivel (2010)	104,7	168,9	137,4
	Malik M. azi (1987)	93,7	154,5	117,1
	Vázquez (2007)*	NA	NA	NA
	Diagrama circular	103,5	160,7	133,2

*Este método no aplica para el generador asíncrono con carga.

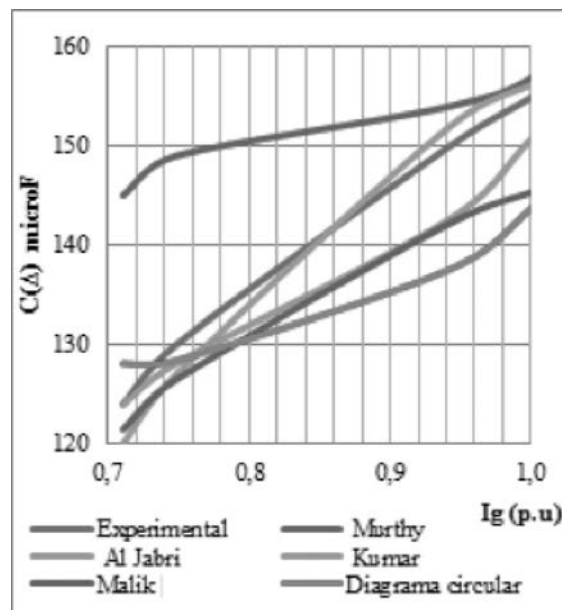
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Comparación de los capacitores C (microF) necesarios conectados en delta “ Δ ” a plena carga del generador, obtenidos por los métodos directos y analíticos para el motor ABB

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Comparación de los capacitores C (microF) necesarios conectados en delta “ Δ ” a plena carga del generador, obtenidos por los métodos directos y analíticos para el motor WEG

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Comparación de los capacitores necesarios conectados en delta “ Δ ” a plena carga del generador C (microF), obtenidos por los métodos directos y analíticos para el motor Siemens

Fuente: elaboración propia.

4 Análisis de resultados

Como se puede observar, los hallazgos muestran una correlación con los valores de capacitancia de autoexcitación requeridos por cada generador asíncrono; de esta manera,

dependiendo de los requerimientos de carga y datos técnicos de cada máquina, se cuenta con una amplia gama de modelos teóricos a partir de los cuales es posible calcular la capacitancia requerida para operar la máquina asíncrona como generador aislado.

Al analizar los resultados obtenidos durante la validación, se resaltan los siguientes aspectos:

- El método que más se aproxima para determinar el valor de los capacitores necesarios conectados en delta “ Δ ” para la autoexcitación en vacío del generador, es el resultado obtenido por el método directo “parámetros nominales”.

- De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 6, 7 y 8, los métodos para determinar el valor de los capacitores necesarios conectados en delta “ Δ ” a plena carga del generador, que más se aproximan a los resultados experimentales, son los presentados por los investigadores Kumar, Kumaresan y Karthigaivel (2010), Malik y Mazi (1987), y los obtenidos en el diagrama circular. Es importante anotar que el último método es el más sencillo.

Es claro que la regulación de la excitación de un generador asíncrono aislado, requiere un banco de capacitores variable conectado en paralelo al generador, los cuales son conectados o desconectados para ajustar los reactivos necesarios. Estas operaciones generan transitorios en la tensión. Sin embargo, en términos experimentales, se observó que el generador con una carga superior al 60 % de la corriente nominal se torna más sensible a los cambios en la demanda, y solía perder tanto la excitación de la máquina como su flujo remanente. Adicionalmente a las pruebas anteriores, en las cargas eléctricas se encontró que un desbalance de corriente de línea superior ± 35 % también conlleva a la pérdida de la excitación de la máquina y, en algunos casos, de su flujo remanente. De igual forma, al analizar la calidad de la sinusoide de los niveles de la distorsión armónica en tensión y la corriente entregada por los generadores, se encontró que los motores ensayados como generadores asíncronos trifásicos (con cargas trifásicas balanceadas) cumplen con la norma Std. IEEE 519, y que sus sinusoides no están distorsionados en magnitud y en tiempo, tal como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Característica de las sinusoides del generador asíncrono autoexcitado en régimen aislado e indicadores de calidad

		Indicador A	Fase (%)		
			B	C	
Motor	Norma	V THD(%)	8.0		
		I THD(%)	5.0		
	Siemens	V THD(%)	0.535	1.202	0.494
		I THD(%)	0.644	0.843	0.498
	ABB	V THD(%)	0.614	0.942	0.445
		I THD(%)	0.394	0.634	0.562
	WEG	V THD(%)	1.058	1.103	1.217
		I THD(%)	0.618	0.696	0.567

Fuente: elaboración propia.

5C conclusiones

La investigación realizada en el laboratorio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, aplicada al uso de generadores asíncrono, además de validar experimentalmente los métodos propuestos por diferentes escuelas y autores, permitió resaltar los siguientes aspectos que se citan a continuación:

- A nivel de MicroCHE, se debe decantar un método sencillo que dé unos valores aproximados para utilizar el motor asíncrono de un modo generador.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, utilizar el método basado en los datos de placa es una buena aproximación al nivel de MicroCHE.
- Un aspecto relevante observado al final de la investigación, conforme a los motores disponibles para nuestras pruebas (ver Tabla 1), es que no se observa una fortaleza significativa al usar motores de alta eficiencia o reparados en calidad de generadores asíncronos. ●

Referencias

Al Jabri, A. K. & Alolah, A. I. (1990). Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator. *IEE Proceedings B Electric Power Apparatus*, 137, 3, 154, 1990.

Chapman, S. J. (1999). *Electric Machinery Fundamentals*. New York: McGraw-Hill International Edition.

Demidovich, Ab. (1998). Generadores Asíncronos en Sistemas Autónomos. Moscú.

Godoy Simoes, M. & Farret, Felix A. (2004). *Renewable Energy Systems Design and Analysis with Induction Generators*. United States: Ed. CRC PRESS.

Ortiz, Esteban & Teowaldo Erazo, Harold. (s. f.). Algoritmo para los procedimientos de regulación de voltaje y frecuencia para un micro central hidroeléctrica aislada con máquinas reversibles. Universidad del Valle. Cali.

Malik, N. H. & Mazi, A. A. (1987). Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, EC-2, 1, 64 - 66.

Murthy, S. S., Nagamani, C. & Satyanarayana, K. V. V. (1998). Studies on the use of conventional induction motors as self-excited induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3, 4.

Kumar, M. S., Kumaresan, N. & Karthigaivel, R. (2010). Determination of Boundary Values of Excitation Capacitance and Minimum Load Impedance for Wind-Driven SEIGs. In *IEEE, Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)* (pp. 1 - 6).

Radin, V. I., Bruskin, D. E. & Zorojovich, A. E. (1988). *Máquinas Asíncronas*. Moscú: Editorial Vischaia Sbl a.

Vázquez, Ramón Alberto. (2007). Simulación de un Generador de Inducción Aislado con carga Monofásica (tesis de maestría, México D. F. Recuperado de <http://www.biblio-sepi.esimez.ipn.mx/electrica/2007/Simulacion%20de%20un%20generador%20de%20inducccion%20aislado%20con%20carga%20monofasica.pdf>.